

AGENTENBASIERTES KOOPERATIONSMODELL ZUR UNTERSTÜTZUNG VERNETZTER PLANUNGSPROZESSE IN DER TRAGWERKSPLANUNG

Jochen Bilek, Dietrich Hartmann

Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum

bilek@inf.bi.rub.de, hartus@inf.bi.rub.de

1. Einführung

Die heutige Situation in der Tragwerksplanung ist durch das kooperative Zusammenwirken einer größeren Anzahl von Fachleuten verschiedener Disziplinen (Architektur, Tragwerksplanung, etc.) in zeitlich befristeten Projektgemeinschaften gekennzeichnet. Bei der Abstimmung der hierdurch bedingten komplexen, dynamischen und vernetzten Planungsprozesse kommt es dabei häufig zu Planungsmängeln und Qualitätseinbußen. Des Weiteren entstehen häufig Planungskonflikte vor allem in der Kooperation und Koordination zwischen den beteiligten Planern. Die aufgezeigten Defizite in der vernetzt-kooperativen Tragwerksplanung haben zumeist unnötige Kostensteigerungen zur Folge.

Eine Verbesserung der Kooperationsunterstützung für die spezifischen Belange der Tragwerksplanung kann durch den gezielten Einsatz von rechnergestützten Netzwerken erreicht werden [3]. Hierbei sind besonders die immer weiter fortschreitende, weltweite Vernetzung durch das Internet sowie Firmennetzwerke zu nennen. Die großen Baukonzerne besitzen solche Firmen-Netzwerke schon seit Jahren. Dagegen ist die interne Computer-Vernetzung der kleineren und mittleren Tragwerkplanungsbüros häufig recht einfach aufgebaut und dient vorwiegend dem Austausch von Dokumenten und Dateien. Die Anbindung zum Internet erfolgt zumeist über eine Schmalband-(Wähl)verbindung (Modem, ISDN), die dem simplen Austausch von Emails mit Dokumenten, Zeichnungen oder anderen Dateien als Anhang dient. Der Trend geht aber auch hier hin zu permanenten Breitbandverbindungen (DSL, Flatrate). Man kann davon ausgehen, dass in naher Zukunft der überwiegende Teil der Planungsbüros permanent mit dem Internet verbunden sein wird. Zusammenfassend kann man feststellen, dass die notwendige Infrastruktur zur computergestützten Verbesserung der Planungs Kooperation bereits vorhanden ist, diese aber in ihren Möglichkeiten nur ansatzweise genutzt wird.

Hier setzt nun das neuartige Konzept der *Multiagentensysteme* (MAS) an. Informatisch gesehen wird ein *Agent* als eine autonome Software-Einheit zur Lösung von spezifischen Problemstellungen angesehen, die einerseits mit menschlichen Aufgabenträgern über eine graphische Benutzerschnittstelle, andererseits mit weiteren Software-Agenten über eine Agentenkommunikationssprache (ACL = agent communication language) interagiert. Die einzelnen Agenten versuchen aktiv, die ihnen aufgetragenen Aufgaben zu erfüllen. Hierzu benötigen sie eine Wissensbasis, die ihnen mitgegeben werden muss. Das Zusammenwirken vieler, räumlich verteilter Agenten ergibt ein dynamisches System, das flexibel, anpassungsfähig und erweiterbar ist (Abbildung 1). Technisch gesehen existieren die einzelnen Agenten auf einer Agentenlaufzeitumgebung (Agentenplattform), die zumeist in

$\text{Agentensystem (AS)}_i = \text{Agentenumgebung}_i + \text{Agenten}_i$

$\text{Multiagentensystem (MAS)} = \sum_i \text{AS}_i$

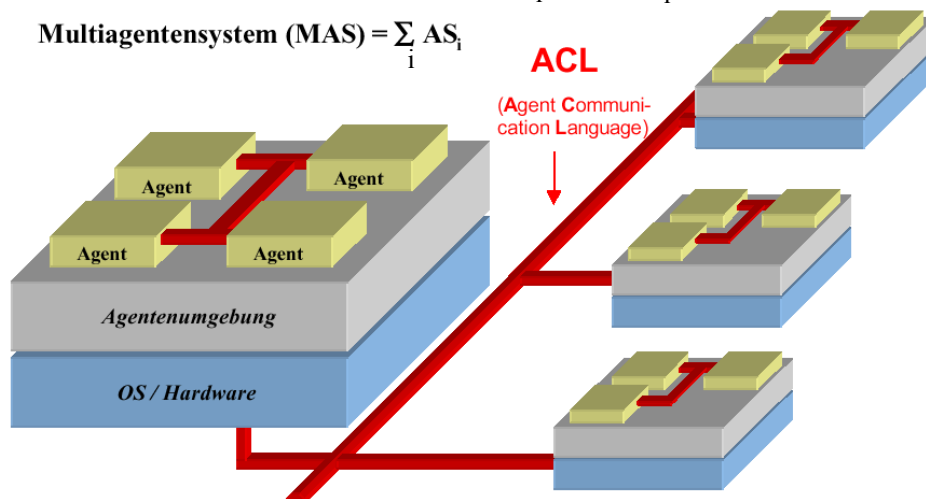


Abbildung 1: Agenten und Multiagentensysteme

einer Agentenlaufzeitumgebung (Agentenplattform), die zumeist in der Programmiersprache Java implementiert ist. Java bietet gerade im Hinblick auf die Realisierung von Agentensystemen wichtige Vorteile gegenüber anderen Programmiersprachen wie Plattformunabhängigkeit, Multithreading, Objektserialisierung u.a.

Betrachtet man die weltweite Forschungstätigkeit im Bereich der Agententechnologie, so wird zwar deutlich, dass vor allem rein informatische Grundlagen bereits in großer Fülle erarbeitet worden sind ([4],[8]), im Bereich der kooperativen Projektbearbeitung in der Tragwerksplanung bisher aber — bis auf einige wenige Ausnahmen ([1],[2],[5],[6],[7]) — so gut wie keine Arbeiten vorliegen.

Die Übertragung der Agententechnologie auf die Belange der vernetzt-kooperativen Projektbearbeitung im Konstruktiven Ingenieurbau hat als Ergebnis ein **Agentenmodell für die vernetzt-kooperative Tragwerksplanung**, welches im Folgenden näher ausgeführt wird.

2. Agentenmodell für die vernetzt-kooperative Tragwerksplanung

Die Dekomposition eines typischen Tragwerkplanungsprozesses ergibt vier grundlegende Bereiche, die durch das Agentenmodell zu erfassen sind: (1) die beteiligten Planer und Akteure (Kooperationsebene), (2) die tragwerksspezifischen Planungsprozesse (Prozessebene), (3) die zugehörigen (Teil-)Produktmodelle (Produktmodellebene) und (4) die genutzte (Ingenieur-)Software (Software-Integration). Hieraus leiten sich ab: (1) das **agentenbasierte Kooperationsmodell**, (2) die **agentenbasierte Produktmodellintegration**, (3) die **agentenbasierte Software-Integration** durch sog. Wrapper-Agenten und darauf aufbauend das **agentenbasierte Prozessmodell**. Erstere drei Teilbereiche werden durch Software-Agenten umgesetzt, die Umsetzung des Prozessmodells erfolgt vorwiegend über die Interaktion der Agenten in den Teilmodellen:

- **Kooperations-Agenten** sind im Wesentlichen Vertreter von realen Planungsbeteiligten (Akteuren) und an der Planung beteiligten Organisationen.
- **Produktmodell-Agenten** repräsentieren im Wesentlichen das Produktmodell einer Tragwerksplanung. Ihre Hauptaufgabe ist die Verwaltung, Kontrolle und Koordination der in ihrem Verantwortungsbereich liegenden Tragwerksobjekte.
- **Wrapper-Agenten** binden bereits vorhandene Software ein und machen sie für alle Agenten nutzbar, unabhängig vom physischen Ort eines Agenten.

Der Wissensverarbeitung und –gewinnung kommt zentrale Bedeutung zu. Die drei Agententypen besitzen entsprechend ihrem Einsatzbereich domänenspezifisches Wissen. Da damit dieses Wissen proaktiv umgesetzt werden kann, werden planbasierte Verfahren eingesetzt.

Im Rahmen dieses Papers soll nun das für die Tragwerksplanung entwickelte agentenbasierte Kooperationsmodell neben den beiden anderen Modellen schwerpunktmäßig näher betrachtet und an einem konkreten Beispiel (Fußgängerbrücke) verdeutlicht werden. Daher werden nun zunächst die Tragstruktur der Bogenbrücke und der zugehörige Tragwerksplanungsprozess kurz dargestellt.

2.1 Referenztragwerk

Bei dem betrachteten Referenzbeispiel handelt es sich um ein Fußgängerbogenbrücke über die Mulde in Dessau. Die Brücke (Bauzeit 1.3.-31.10.2000) verbindet die Stadt Dessau mit der Auenlandschaft und dem Wörlitzer Gartenreich am anderen Ufer der Mulde. Die Brücke ist ca. 100 m lang. Die Neigung des Bogens beträgt ca. 22°. Teiltragsysteme sind der Bogen, die Fahrbahn, die Bogenwiderlager und die Fahrbahnwiderlager. Das Teiltragsystem *Bogen* besteht aus einem Bogenträger aus Stahl mit 15 Zugstangen, an denen die Fahrbahn aufgehängt ist. Das Teiltragsystem *Fahrbahn* wiederum besteht im Wesentlichen aus Stahlblechen, die den Fahrbahnquerschnitt bilden, und dem Geländer. Das Geländer spielt jedoch in der Betrachtung eine untergeordnete Rolle, da es sich um ein nichttragendes Bauteil handelt. Das Tragsystem *Fahrbahn* setzt sich aus je einer Fahrbahnplatte oben und unten, 15 Querschotten, 15 Speeren, 3 Längsschotten und 2 Anschlussblechen an den Auflagern zusammen. Die Teiltragsysteme *Widerlager* sind aus Stahlbeton. Alle Widerlager sind ihrerseits auf Verpresspfählen (6 Bündel á 4 Pfähle) gegründet.

Die Analyse des Planungsprozesses ergab, dass dieser in vier Planungsphasen untergliedert werden konnte: *Vorentwurf/ Vorbemessung*, *strukturanalytische Berechnung*, *Nachweise/ Bemessung* und *Konstruktive Durchbildung*. Dies entspricht im Wesentlichen den maßgeblichen HOAI-Phasen I-IV und ist in der Baupraxis und Tragwerksplanung de facto die übliche Vorgehensweise. Vor allem während den ersten beiden Planungsphasen kam es zu iterativen Prozessen: aufgrund eines unzulänglichen dynamischen Tragwerkverhaltens und speziellen Anforderungen aus der Fertigung (Stahlbau) musste das ursprüngliche Tragwerksmodell mehrmals geändert werden. So musste beispielsweise die Fahrbahn, die ursprünglich als reiner Kreisbogen konzipiert war, in mehrere polygonale Segmente aufgeteilt und zu einem quasi-Kreisbogen zusammengesetzt werden, da die ausführende Stahlbau-Firma einen reinen Kreisquerschnitt nicht fertigen konnte.

An der Planung und Ausführung waren mehrere Baufirmen (Stahlbau-Firma: Bogen und Fahrbahn; Betonbau-Firma: Widerlager; eine weitere Firma, die die Bohrpfähle eingebracht hat), die Stadt Dessau zum einen als Auftraggeber und zum anderen als Baubehörde und ein Tragwerkplanungsbüro beteiligt.



Abbildung 2: Referenztragwerk Fußgängerbogenbrücke über die Mulde in Dessau

2.2 Agentenbasiertes Kooperationsmodell

Ziel des agentenbasierten Kooperationsmodells ist es, das menschliche Beziehungs- und Organisationsgeflecht durch Kooperations-Agenten realitätsnah abzubilden, um dadurch eine gezielte Kooperationsunterstützung der einzelnen Fachplaner zu ermöglichen. Des Weiteren ist es unerlässlich, die Kooperations-Agenten so zu entwerfen, dass diese wiederverwendbar sind und sich ständig wechselnden Projektsituationen dynamisch anpassen können. Will man für die Tragwerksplanung geeignete Kooperations-Agenten entwickeln, muss man zunächst wichtige tragwerksplanungsspezifische Bestandteile eines solchen Kooperationsmodells identifizieren.

Diese sind zum einen die beteiligten Akteure, zum anderen die diesen zugeordneten Organisationseinheiten, und drittens die zeitabhängig ablaufenden Tragwerkplanungsprojekte. Jeder Akteur bzw. jede Organisation wird dabei durch einen Kooperations-Agenten vertreten.

Typische Organisationseinheiten in der Tragwerksplanung sind die fachspezifisch ausgerichteten Planungsbüros; diese kooperieren mit anderen Planungsorganisationen und bilden zeitlich begrenzte Projekte und Arbeitsgemeinschaften (ARGE). Für die Agentenmodellierung wurde angenommen, dass Tragwerksplanungs-, Architektur-, Fachplanungsbüros, ausführende Firmen und Behörden als *bürobezogene Organisationen* anzusehen sind, Projekte und Arbeitsgemeinschaften dagegen werden als *projektbezogene Organisationen* aufgefasst. Die Organisationsform Projekt stellt letztlich eine Komposition aus Teilen anderer bürobezogener Organisationen dar und ist die Schnittstelle zwischen Fachplanern, Planungsprozessen und (Teil-) Produktmodellen. Überdies muss jeder an der Projektabwicklung beteiligte Fachplaner durch einen eigenen, permanent existenten Kooperations-Agenten repräsentiert sein. Dieser übernimmt vielfältige Aufgaben, die der ihm zugeordnete Fachplaner ihm anvertraut.

Zusammenfassend werden Kooperations-Agenten, die Organisationen repräsentieren, als **unpersönliche Kooperations-Agenten** (Büro- und Projekt-Agenten) definiert. Agenten dagegen, die als Schnittstelle von Planer zu Agentensystem dienen, werden als **persönliche Kooperations-Agenten** definiert.

Der Aufbau der einzelnen Kooperations-Agenten besteht im Wesentlichen aus einer Steuereinheit, einer Kommunikationsschnittstelle und einer wissensverarbeitenden Komponente. Persönliche Kooperations-Agenten sind zudem direkt mit einer graphischen Benutzerschnittstelle ausgestattet. Die Entwicklung der Kooperations-Agenten erfolgt generisch. Die Anpassung der Agenten an individuelle, projektspezifische oder bürobezogene Gegebenheiten erfolgt dynamisch durch die verantwortlichen Aufgabenträger.

Die Analyse des Referenztragwerks hat nun ergeben, dass insgesamt 7 Organisationen im Agentenmodell modelliert werden müssen. Dies sind zum einen die bereits in 2.1 genannten Firmen und Behörden und zum anderen die von diesen gebildete, neue Organisationseinheit „Projekt Bogenbrücke über die Mulde“. Diese Organisationen werden im Agentenmodell durch eigenständige, **unpersönliche Kooperationsagenten** repräsentiert, die Wissen über ihre jeweilige Organisation (Mitarbeiter, Ausstattung, Ressourcen, Projekte, etc.) besitzen. Die Analyse des Planungsprozess hat überdies gezeigt, dass mehrere technische Mitarbeiter aus den beteiligten Organisationen mit verschiedenen Aufgaben und Funktionen (= Rollen) an der Planung der Brücke beteiligt waren. Das Planungsbüro stellte beispielsweise zwei Mitarbeiter ab: einen Projektleiter, der zugleich für die Planung des Bogens zuständig war und einen weiteren Diplomingenieur, der die Fahrbahn berechnet und geplant hat. Eine Übersicht über die beteiligten Personen und ihre Rollen im Projekt gibt Abbildung 3.

Zur Erfassung der Prozesse, die zwischen den einzelnen Planern bzw. den ihnen zugeordneten Agenten ablaufen, werden graphentheoretische Ansätze eingesetzt. Die Tragwerksplanung ist jedoch durch nicht-deterministische, dynamische Prozessstrukturen geprägt.

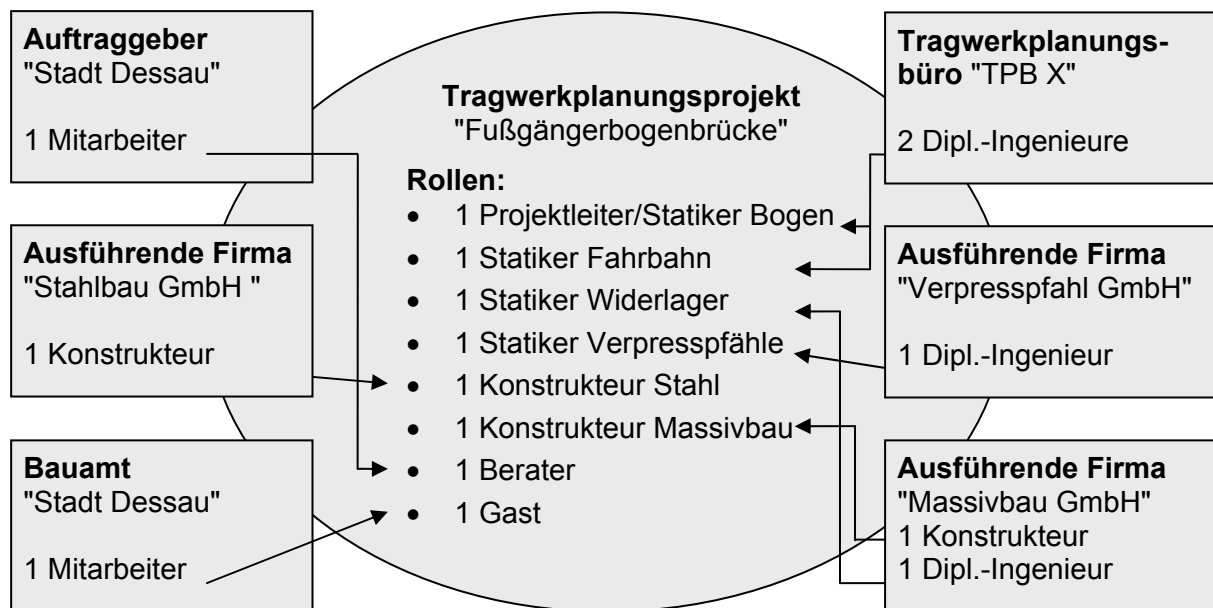


Abbildung 3: Idealisiertes Rollen- und Organisationsmodell

Diese erfordern daher letztlich in unauflösbaren Konfliktsituation immer ein Eingreifen der jeweiligen Fachplaner.

2.3 Agentenbasiertes Produktmodell

Der Beschreibung der Bogenbrücke in 2.1 folgend, kann das Referenztragwerk in vier Teil-tragsysteme heruntergebrochen werden: der Bogen, die Fahrbahn, die Bogenwiderlager und die Fahrbahnwiderlager. Aus den vier Teiltragsystemen ergeben sich nun vier systembezogene Produktmodell-Agenten, die untereinander abgestimmt sind: Jeder einzelne verwaltet die zugehörigen Bauteile (Objekte) und überwacht Aufträge. Um eine Gesamtkoordination aller am Tragwerkplanungsprozess beteiligten Produktmodell-Agenten zu erreichen und diese zentral steuern zu können, muss es zusätzlich zu den vier Produktmodell-Agenten noch einen weiteren Produktmodell-Agenten – hier den Produktmodell-Agenten *Gesamttragwerk Bogenbrücke* – geben. Insgesamt sind also fünf Produktmodell-Agenten vorhanden.

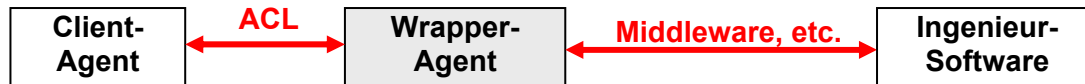
Die genannten Produktmodell-Agenten gehören zur Organisation *Projekt Bogenbrücke*. Sie können vom Projekt-Kooperations-Agenten erfragen, welche Agenten zur Organisation *Projekt Bogenbrücke* gehören und welche Rollen diese in der Organisation vertreten. Aus diesen Informationen können die Produktmodell-Agenten bestimmen, wer welche Änderungen am Tragwerksmodell vornehmen darf. Die Produktmodell-Agenten wechseln ihrerseits ihre Rolle in Abhängigkeit von der Tragwerkplanungsphase. Beispielsweise macht es der Übergang von Phase *Bemessung* zu Phase *Konstruktive Durchbildung* erforderlich, das Produktmodell im Hinblick auf Anschlüsse und weitere Details zu erweitern.

Das Produktmodell ist zunächst proprietär in XML beschrieben und mit XML-Schemata spezifiziert und kann so leicht in eine XML-basierte Datenbank abgespeichert werden.

2.4 Agentenbasierte Software-Integration

Mit der Festlegung des Konzepts des Software-Wrapping wird erreicht, dass bereits vorhandene, heterogene Software durch den Einsatz von Wrapper-Agenten in das MAS eingebunden und die Software allen Agenten zugänglich gemacht werden kann, unabhängig von ihrem physischen Ort. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bewährte Ingenieur-Software, wie z.B. FE-Programme, CAD-Systeme, Datenbanken oder Nachweis-Pakete in der Agen-

tentechnologie nutzbar bleibt – ein nicht zu unterschätzender Vorteil. Die entwickelten Wrapper-Agenten wirken infolgedessen als Schnittstelle zwischen lokal installierter Software und dem Multiagentensystem; sie *umhüllen* (to wrap = umhüllen) bestehende Software und binden diese über entsprechende Technologien wie z.B. Middleware, SQL, etc. nach folgenden Schema in das MAS ein:



Die bei der tatsächlichen Planung des Referenztragwerks eingesetzte Software stand für die eigene Forschungsarbeit nicht mehr zur Verfügung. Stattdessen wurde folgende, in Bochum verfügbare FE-Software mittels eines **FE-Wrapper-Agenten** eingebunden: "Ansys5.6" und "Finite Element light (FElt)". Ebenso wurde ein **Datenbank-Wrapper-Agent**, der die XML-Datenbank Xindice und die relationale Datenbank MySQL einbindet, entwickelt. Zudem konnte ein **CAD-Wrapper-Agent** aufgebaut werden, der die CAD-Standard Software AutoCAD2000 einbindet. Mit dem CAD-Wrapper-Agenten ist es möglich, zum einen in XML-spezifizierte Produktmodell-Daten zeichnen zu lassen und zum anderen interaktive CAD-Sitzungen abzuhalten, an denen mehrere, verteilt und parallel arbeitende Planer gleichzeitig an einer Zeichnung arbeiten können.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend liegen die Vorteile des agentenbasierten Modells für die Tragwerksplanung — und hier insbesondere des agentenbasierten Kooperationsmodells — gegenüber klassischen Kooperationsumgebungen wie CSCW- oder Workflowsystemen vor allem in der dezentralen, aktiven, flexiblen, anpassungsfähigen und dynamischen Struktur des Multiagentensystemansatzes. Komplexe Beziehungsgeflechte, wie sie bei jedem Tragwerksplanungsprozess auftreten, können nunmehr realitätsnah abgebildet werden und so die Tragwerksplanung insgesamt besser unterstützen als dies bisher möglich war.

Bisher sind nur Teile des Gesamtkonzepts prototypisch umgesetzt worden; der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit lag zunächst vielmehr auf der Modellierungsebene. Für die Zukunft ist daher geplant, die erarbeiteten Konzepte und Modelle in Software zu gießen und diese hierdurch zu überprüfen und zu evaluieren.

4. Literatur

- [1] Bilek, J., Hartmann, D.: *Collaborative Structural Engineering based on Multiagent Systems*, Advances in Intelligent Computing in Engineering, EG-ICE Workshop 2002, Darmstadt, Germany.
- [2] Bilek, J. and Hartmann, D.: *Development of an Agent-based Workbench Supporting Collaborative Structural Design*, The 20th CIB W78 Conference on Information Technology in Construction, accepted paper, Waiheke Island, Neuseeland, 23-25 April 2003.
- [3] Bretschneider, D. et al.: *Modelling collaborative engineering in object orientated design systems*, Mouchel Centenary Conference. Cambridge, 1997.
- [4] Ferber, J.: *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison Wesley, Edinburgh, UK, 1999.
- [5] Khedro, T.: *AgentCAD: a distributed cooperative CAD environment*, In B. Kumar, A. Retik, editor. Volume Information Representation and Delivery in Civil and Structural Engineering Design', p. 15-19., Civil-Comp Press, University of Strathclyde, Glasgow, 1996.
- [6] Norrie, D. H. et al.: *Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing*, Taylor & Francis, London, UK, 2000.
- [7] Rosenman, M., Wang, F.: *CACOM: A Component Agent-based Design-Orientated Model for Collaborative Design*, Research in Engineering Design11, p.193-205., Springer, London, 1999.
- [8] Wooldridge, M.: *An Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2000.